

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.622.4

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ ПЕРЛИТА

© 2021 г. Е. А. Щапова^а, *, А. Н. Сташков^а, С. В. Афанасьев^а, А. П. Ничипурук^а

^аИнститут физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

*e-mail: schapova@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 09.04.2021 г.

Принята к публикации 12.04.2021 г.

Показано, что в эвтектоидной стали размер и форма цементитных включений определяет магнитные свойства как в недеформированном, так и в пластически деформированном состояниях. Установлено, что в недеформированном состоянии коэрцитивная сила у стали с тонкопластинчатым перлитом наибольшая, а у стали с грубопластинчатым перлитом – наименьшая. Пластическая деформация растяжением приводит к увеличению коэрцитивной силы и уменьшению остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости образцов. Появление перегиба или второго максимума на полевых зависимостях магнитной восприимчивости, измеренных вдоль направления деформации, указывает на возникновение магнитной текстуры типа “легкая плоскость”, вызванной остаточными напряжениями сжатия. Рассчитанные значения полей наведенной магнитной анизотропии образцов из эвтектоидной стали с различной морфологией перлита в исходном недеформированном состоянии составили от 10.4 до 19.1 А/см. В пластически деформированных образцах наблюдали увеличение поля наведенной магнитной анизотропии, а значит, и внутренних остаточных напряжений по сравнению с недеформированным состоянием.

Ключевые слова: эвтектоидная сталь, глобулярный перлит, пластинчатый перлит, магнитные свойства, поле наведенной магнитной анизотропии

DOI: 10.31857/S0015323021080131

ВВЕДЕНИЕ

Стали с перлитной структурой широко применяются на практике для изготовления рельсов, проволоки и арматуры, различных инструментов [1]. В последнее время такие стали вызывают большой интерес исследователей, поскольку их потенциал по повышению прочностных и других важных для эксплуатации свойств реализован не в полной мере [2]. Известно, что в зависимости от проведенных технологических операций (термическая обработка, термомеханическая обработка [3]) эвтектоидная сталь может обладать структурой пластинчатого и глобулярного перлита. Возможны и некоторые промежуточные варианты, о которых упоминается, например, в [2]. Морфологические особенности перлита определяют свойства конечного продукта. Так, например, обладая структурой пластинчатого перлита, изделие будет обладать повышенной прочностью, но низкой пластичностью и высокой хрупкостью. Более того, свойства в значительной мере будут зависеть от межпластинчатого расстояния [4, 5]. При этом в работе [6] сказано об открытии новой микроструктурной составляющей эвтектоидных сталей – перлитной псевдоколонии, которая характеризуется

отсутствием ориентирования пластин колонии вдоль направления проката.

Поскольку перлит представляет собой ферритную матрицу с выделениями цементита, цементит как структурная составляющая перлита играет важную роль в формировании магнитных свойств. В работе [7] было показано, что коэрцитивная сила перлитных сталей в значительной мере определяется структурным состоянием цементита. Установлено, что цементит, способный иметь разную форму и размеры, в некоторых случаях может иметь неоднозначную зависимость коэрцитивной силы от степени деформации. Поскольку на коэрцитивную силу перлитных сталей оказывает влияние не только степень деформации, но и размер и форма цементита, остро стоит вопрос о возможности количественной оценки остаточных напряжений в таких сталях.

Интерес к этому вопросу проявляли, например, авторы работы [8], исследовавшие гистерезисные свойства, магнитоотрицательную и обратимую магнитную проницаемость при воздействии на образец из перлитной стали переменных одноосных растягивающих нагрузок. Авторы статьи да-

ли объяснение поведению магнитных свойств при напряжениях выше и ниже предела текучести с точки зрения движения доменов и скоплений дислокаций. В исследовании дано качественное объяснение магнитоупругого эффекта, но не проведено количественной оценки внутренних механических напряжений. В работе [9] было установлено, как изменяются магнитные свойства перлитных сталей с вариацией содержания углерода в зависимости от степени пластической деформации. Для каждой из исследованных сталей были построены зависимости магнитных свойств от степени пластической деформации. Измерены полевые зависимости дифференциальной проницаемости для каждого значения деформации. В этом исследовании были выявлены особенности полевых зависимостей дифференциальной проницаемости для деформированных образцов: наличие двух максимумов (перегибов) в области положительных и отрицательных полей. Методика количественной оценки остаточных механических напряжений в низкоуглеродистых сталях, основанная на математическом анализе полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости, была разработана нашим коллективом [10, 11].

Анализ научной литературы показал, что много внимания уделено изучению фундаментальных свойств перлитных сталей при вариации их химического состава и напряженного состояния. Тем не менее до сих пор остается открытым вопрос о влиянии морфологии перлита на магнитные свойства стали эвтектоидного состава, где в отличие от до- и заэвтектоидных сталей в структуре присутствует только эвтектоидная смесь феррита и цементита — перлит. Кроме того, не уделено внимание возможности количественной оценки механических напряжений в перлитных сталях с различной формой и размерами цементитных включений по магнитным параметрам. Цель данной работы заключается в исследовании магнитных свойств эвтектоидной стали с различной морфологией перлита в недеформированном, а также в пластически деформированном растяжением состояниях, и количественной оценке поля наведенной магнитной анизотропии, пропорционального остаточным механическим напряжениям в стали.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Образцы для исследований были изготовлены из стали эвтектоидного состава (C 0.75–0.84%; Si 0.17–0.33%; P < 0.03%; S < 0.028%; Cr < 0.2%; Ni < 0.25%; Cu < 0.25%; Fe остальное). Размеры образцов составляли $2 \times 8 \times 250$ мм³. Образец № 1 имел глобулярную форму перлита. Структура пластинчатого перлита (образец № 2) получена путем

термической обработки стали с глобулярным перлитом: 1050°C, 3 мин → 650°C, 1 ч → охлаждение на воздухе. Пластинчатая форма перлита образца № 3 была достигнута в заводских условиях при изготовлении (режимы изготовления не разглашаются).

Измерение магнитных свойств исследуемых образцов (коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции B_r , максимальной магнитной проницаемости μ_{max}) проводили на установке Remagraph C-500 компании Magnet-Physik Dr Streingroever GmbH (погрешность измерения магнитного поля — 2%, индукции — 1%).

Микроструктура образцов исследована с помощью оптического микроскопа Olympus GX-51. Пластическая деформация растяжением проведена на машине для механических испытаний Instron 5982 в центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН. Скорость деформации — 2 мм/мин, максимальное относительное удлинение образцов — 1.5%. Величина относительного удлинения 1.5% была выбрана из тех соображений, что основные изменения свойства происходят до относительных удлинений 1.5–2%.

Измерение твердости по Виккерсу проведено на установке Zwick ZHV 30. На каждом образце было сделано 10 уколов, с выдержкой каждого в течение 10 с. Нагрузка принимала значения 9.8, 49.03 и 98.07 Н. Погрешность измерения не превышала 4%.

Разделение вкладов в процесс перемагничивания от смещения 90- и 180-градусных доменных границ и количественная оценка полей наведенной магнитной анизотропии выполнены по модели, предложенной в работе [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Структурные исследования

Известно, что микроструктура обуславливает магнитные и механические свойства сталей. Основное влияние на свойства оказывают размер зерна, форма и размер включений, например, карбидов, их количество и направленность.

На рис. 1 представлена структура образца № 1 со сферическим цементитом, сформировавшимся в ферритной матрице. Выделения сферического цементита Fe_3C наблюдаются как по границам ферритных зерен, так и внутри. Размер ферритного зерна составляет от 10 до 30 мкм. Диаметр сферических цементитных включений 2 мкм, по границам зерен сферические выделения образуют вытянутые конгломераты длиной до 5 мкм. Согласно классификации по степени дисперсности, структура может быть охарактеризована как крупнозернистый перлит. Средняя твердость об-

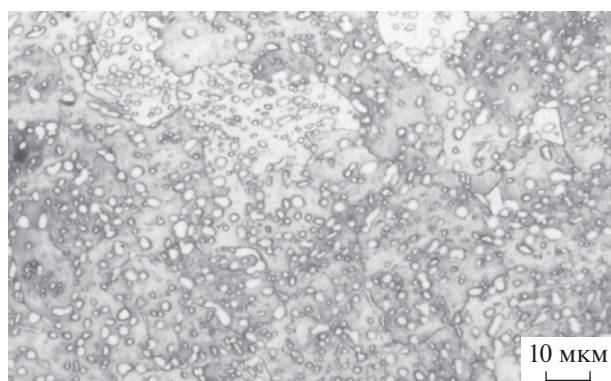


Рис. 1. Микроструктура глобулярного перлита, образец № 1.

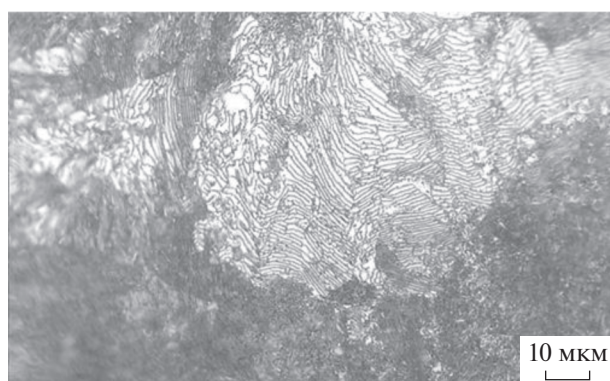


Рис. 2. Микроструктура тонкопластинчатого перлита, образец № 2.



Рис. 3. Микроструктура грубопластинчатого перлита, образец № 3.

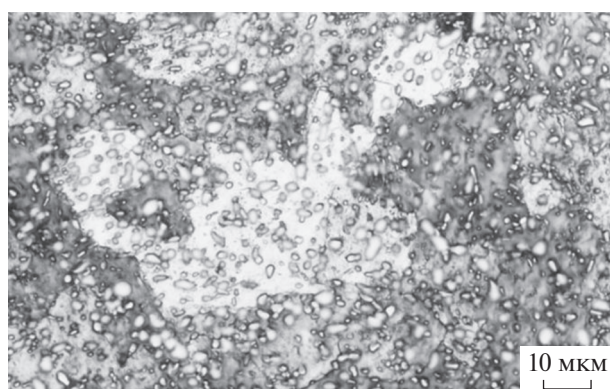


Рис. 4. Микроструктура глобулярного перлита (образец № 1) после растяжения на 1.5%.

разца № 1 составляет 176 единиц по Виккерсу, однако стоит отметить довольно большой ее разброс в разных частях образца от 163 до 190 *HV*, что говорит о неоднородности структуры.

Изображения структуры стали (образцы № 2 и № 3, рис. 2 и 3 соответственно) показывают, что цементит в этих случаях имеет пластинчатую форму, но размер пластин и межпластинчатые расстояния различаются. Различен и размер зерна. Твердость образца № 2 составляет 275 *HV*, межпластинчатое расстояние в перлите – 0.3–0.5 мкм. Такая структура классифицируется как тонкопластинчатый перлит. Тонкопластинчатый перлит наблюдается внутри крупных областей (зерен), их размер достигает 50 мкм. Межпластинчатое расстояние в перлите, изображенном на рис. 3, варьируется от 1 до 5 мкм. Структуру образца № 3 можно охарактеризовать как грубопластинчатый перлит. Образец № 3 имеет более низкую твердость (223 *HV*), при этом размер зерна достигает 100 мкм.

Пластическая деформация привела к изменениям микроструктуры образцов. На рис. 4 наблю-

дается овальная форма цементитных включений, их размер составляет от 1.5 до 5 мкм, что соответствует грубозернистому перлиту. Размер ферритного зерна остается неизменным по сравнению с недеформированным образцом. Средняя твердость образца № 1 после деформации принимает значение 173 *HV*.

На рис. 5 приведено изображение микроструктуры пластически деформированного образца № 2. Размер зерна достигает 100 мкм. Межпластинчатое расстояние варьируется от 0.2 до 3 мкм. Твердость образца немного уменьшается по сравнению с недеформированным образцом и составляет в среднем 265 *HV*.

Пластическая деформация образца № 3 привела к уменьшению межпластинчатого расстояния (рис. 6). Средний размер зерна увеличился, размер отдельных зерен превышает 100 мкм. В локальных участках образца можно наблюдать излом пластин цементита, что вызвано действием механических напряжений. Среднее значение твердости составляет 243 *HV*, что превышает на 20 единиц твердость в исходном состоянии.



Рис. 5. Микроструктура пластинчатого перлита (образец № 2), после растяжения на 1.5%.

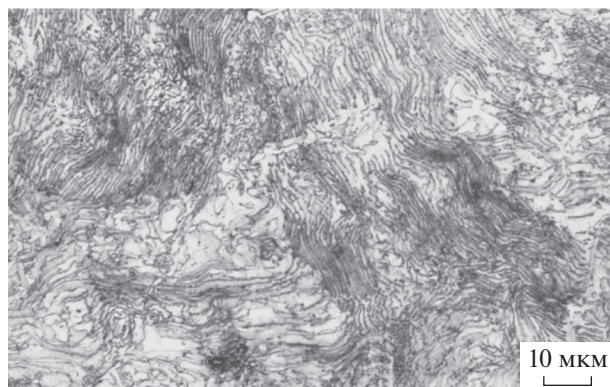


Рис. 6. Микроструктура пластинчатого перлита (образец № 3), после растяжения на 1.5%.

2. Магнитные свойства

В табл. 1 представлены магнитные характеристики стали в исходном и деформированном состояниях.

Видно, что наибольшей коэрцитивной силой $H_c = 8.5$ А/см в исходном недеформированном состоянии обладает сталь со структурой тонкопластинчатого перлита (образец № 2). Наименьшая коэрцитивная сила (6.4 А/см) наблюдается у стали с грубопластинчатым перлитом (образец № 3). Этот факт стал несколько неожиданным, так как считается, что коэрцитивная сила стали с глобулярным перлитом должна быть меньше, нежели у этой же стали с пластинчатым перлитом. Известно, что коэрцитивная сила определяется средней величиной сил, задерживающих необратимое смещение границ между доменами [13]. Среди факторов, задерживающих такое смещение, можно выделить неферромагнитные включения различной формы и дисперсности, границы зерен и субзерен и прочие неоднородности и дефекты кристаллического строения. В работах [14, 15] показано, что коэрцитивная сила, в зависимости от структурного состояния цементита, может иметь значения от 80 до 240 А/см. Объемная доля цементита в исследованных образцах по результатам рентгеноструктурного анализа велика и достигает 23%. Помимо процентного содержания магнито жесткой фазы цементита на коэрцитивную силу стали оказывает влияние дисперсность пластинчатого перлита. По всей видимости, коэрцитивная сила образца с пластинчатым перлитом кардинально зависит от межпластинчатого расстояния и толщины самих цементитных пластин. Этим объясняется различие в коэрцитивной силе образцов № 2 и № 3 более чем на 2 А/см (табл. 1).

Наибольшая остаточная индукция $B_r = 1.3$ Тл в исходном состоянии наблюдается у образца № 1, что на 0.3 Тл больше, чем у образца № 3 с грубопластинчатым перлитом (табл. 1).

Максимальная магнитная проницаемость μ_{\max} пластинчатого перлита в исходном состоянии, полученного путем комплексной термической обработки, значительно меньше соответствующих значений для образцов № 1 и № 3.

После растяжения на 1.5% значения как остаточной индукции, так и максимальной магнитной проницаемости для всех трех образцов сближаются, демонстрируя тенденцию к уменьшению. Значения коэрцитивной силы растут. При этом наибольший рост коэрцитивной силы от 7.7 до 13.3 А/см наблюдается у образца № 1 с глобулярным перлитом.

На рис. 7 представлены петли гистерезиса для трех образцов в исходном состоянии, а на рис. 8 — для пластически деформированных образцов. Для петель гистерезиса пластически деформированных образцов (рис. 8) характерно наличие перегибов ветвей в области коэрцитивной силы.

На рис. 9 и 10 представлены полевые зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости для исходных и пластически деформированных образцов. Визуально кривые отличаются друг от друга: на кривых пластически деформированных образцов появляются перегибы в отрицательных полях, основной максимум наблюдается в положительных полях в районе коэрцитивной силы.

Таблица 1. Магнитные свойства

Образец	$\Delta l/l, \%$	$H_c, \text{А/см}$	$B_r, \text{Тл}$	μ_{\max}
№ 1	0	7.7	1.3	605
	1.5	13.3	0.6	265
№ 2	0	8.5	0.9	383
	1.5	11.7	0.6	238
№ 3	0	6.4	1.0	614
	1.5	10.3	0.6	262

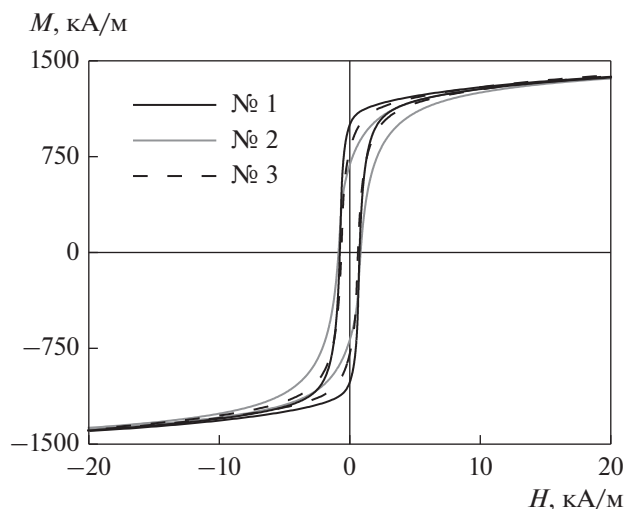


Рис. 7. Петли гистерезиса эвтектоидной стали с разной формой перлита в исходном состоянии.

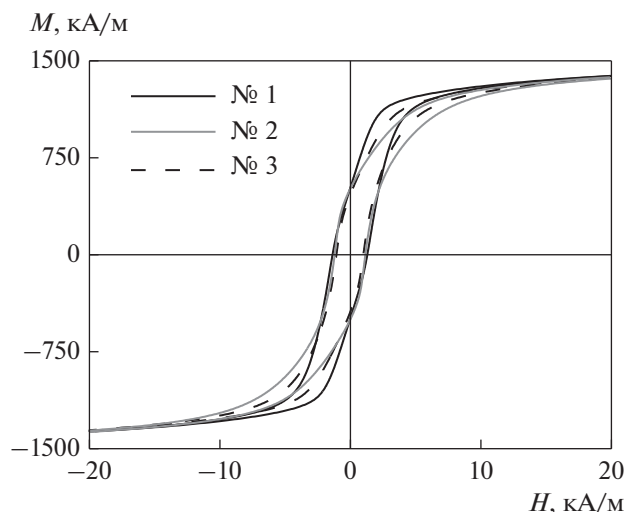


Рис. 8. Петли гистерезиса эвтектоидной стали с разной формой перлита после растяжения на 1.5%.

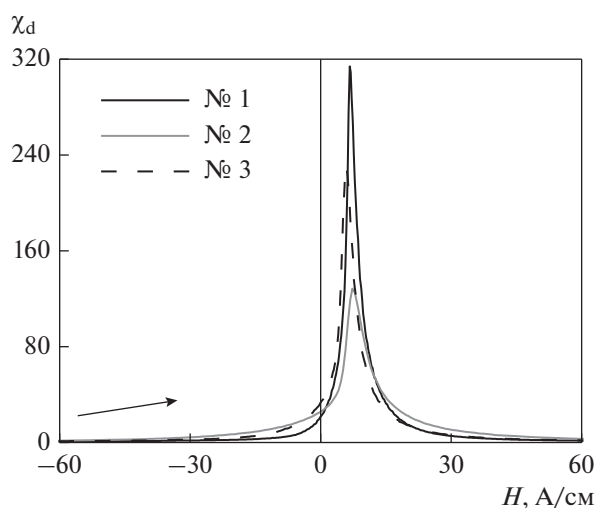


Рис. 9. Полевые зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости эвтектоидной стали с разной формой перлита в исходном состоянии.

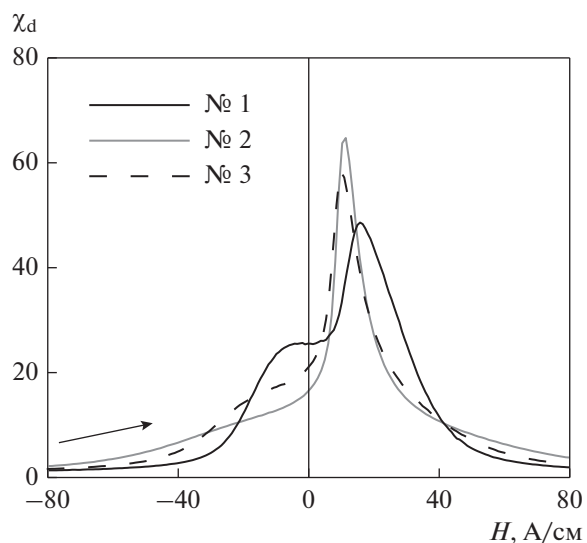


Рис. 10. Полевые зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости эвтектоидной стали с разной формой перлита после растяжения на 1.5%.

Появление перегибов на кривых (рис. 10) свидетельствует о появлении магнитной текстуры типа “легкая плоскость” [11]. Амплитуда основных максимумов на кривых (рис. 10) уменьшается по сравнению с амплитудой максимумов на кривых (рис. 9), а их ширина увеличивается. Кроме того, вид полевых зависимостей дифференциальной магнитной восприимчивости, представленных на рис. 10, различается для разных образцов. Например, для образцов № 2 и № 3 кривые похожи друг на друга: присутствуют “размытые” перегибы в отрицательном поле и четкие максимумы в области поля коэрцитивной силы. Для образца

№ 1 кривая имеет явные максимумы в области отрицательных и положительных полей (рис. 10).

Данные кривые полевых зависимостей дифференциальной магнитной восприимчивости используем для расчета полей наведенной напряженности магнитной анизотропии по модели гистерезиса для кристаллов с кубической симметрией, предложенной и описанной в [12]. В модели используется тот известный факт, что изменения направления намагниченности внутри каждой области происходят лишь тогда, когда перемагничивающее поле достигает некоторого критического значения. Это позволяет в рамках модели

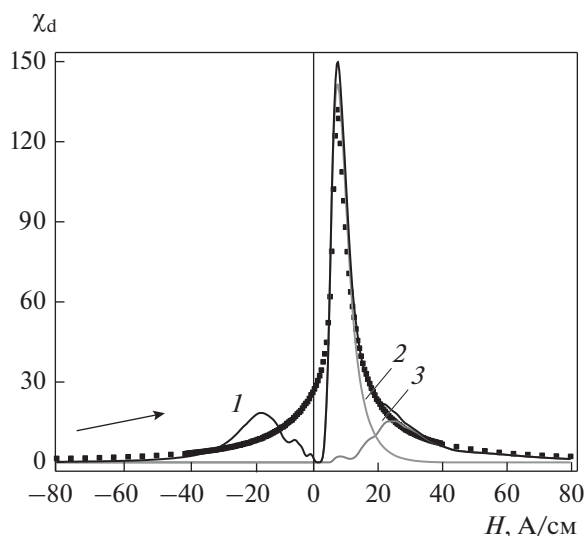


Рис. 11. Пример разложения кривой дифференциальной магнитной восприимчивости по модели [12]: точки — эксперимент; 1 — полная расчетная восприимчивость; 2 — восприимчивость для 180° ДГ; 3 — восприимчивость для 90° ДГ.

рассчитать критические поля для смещения 180- и 90-градусных доменных границ (ДГ).

На рис. 11 представлен пример разложения восприимчивости на составляющие для образца № 2 в исходном состоянии.

По модели [12] были рассчитаны поля наведенной магнитной анизотропии для каждого из образцов в исходном недеформированном состоянии и после пластической деформации растяжением. В табл. 2 представлены полученные результаты.

Данные, представленные в табл. 2, показывают, что наибольшие поля наведенной магнитной анизотропии у образца № 2 со структурой тонкопластинчатого перлита: в исходном недеформированном состоянии поле принимает значение 19.1 А/см, после деформации — 31.1 А/см. Наименьшие поля наведенной магнитной анизотропии получены для образца № 1 со структурой глобулярного перлита — 10.4 и 22.7 А/см в недеформированном и пластически деформированном состояниях, соответственно.

Известны два основных фактора, определяющих величину поля наведенной магнитной анизотропии: рассеяние магнитных полей на слабо-

магнитных включениях (примесях, карбидах, дефектах) и остаточные механические напряжения. Поэтому из-за полей рассеяния на цементитных включениях и случайно распределенных механических напряжений в исходном недеформированном состоянии исследованных образцов значения полей наведенной магнитной анизотропии составили более 10 А/см. После пластической деформации значения полей наведенной магнитной анизотропии значительно увеличиваются. Это свидетельствует о росте остаточных механических напряжений в исследованных образцах, вносящих существенный вклад в величины полей наведенной магнитной анизотропии. Причем, чем больше остаточные механические напряжения, тем больший вклад они вносят в величину поля наведенной магнитной анизотропии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе измерены магнитные свойства и исследована структура эвтектоидной стали с различной формой и размером цементитных включений как в исходном недеформированном, так и пластически деформированном состояниях. Установлено, что в недеформированном состоянии образцы с тонкопластинчатым перлитом имеют наибольшую коэрцитивную силу и наименьшие значения остаточной магнитной индукции и максимальной магнитной проницаемости среди исследованных образцов. Неожиданно у образцов с глобулярным перлитом коэрцитивная сила оказалась больше, чем у образцов с грубопластинчатым перлитом. Вероятно, что разница в магнитных свойствах обусловлена различием в форме и размере цементитных включений.

Пластическая деформация растяжением привела к увеличению коэрцитивной силы и уменьшению остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости образцов. Наибольшие изменения магнитных свойств после деформации наблюдали у образцов с глобулярным и грубопластинчатым перлитом. Появление характерного перегиба или второго максимума на полевых зависимостях магнитной восприимчивости, измеренных вдоль направления деформации, является признаком возникновения магнитной текстуры типа “легкая плоскость”, вызванной остаточными напряжениями сжатия.

Рассчитанные значения полей наведенной магнитной анизотропии образцов из эвтектоидной стали с различной морфологией перлита в исходном недеформированном состоянии оказались велики и составили от 10.4 до 19.1 А/см, что можно объяснить большими полями рассеяния на слабомагнитных включениях цементита и случайно распределенными напряжениями. В пластически деформированных образцах наблюдали увеличение поля наведенной магнитной анизотропии, а

Таблица 2. Поля наведенной магнитной анизотропии H_a , рассчитанные по модели [12]

H_a , А/см	$\Delta l/l$, %	№ 1	№ 2	№ 3
	0		10.4	19.1
1.5		22.7	31.1	25.1

значит, и внутренних остаточных напряжений по сравнению с недеформированным состоянием. Наибольшее значение поля наведенной напряженности магнитной анизотропии наблюдали у деформированного образца с тонкопластинчатым перлитом.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема “Диагностика”, № АААА-А18-118020690196-3) при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90139.

Авторы признательны Н.В. Казанцевой за помощь в описании результатов микроскопических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Счастливцев В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л., Окишев К.Ю., Табатчикова Т.И., Хлебникова Ю.В. Перлит в углеродистых сталях. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 311 с.
2. Zheng C., Li L., Yang W., Sun Z. Enhancement of mechanical properties by changing microstructure in the eutectoid steel // Mater. Sci. Eng. A. 2012. V. 558. P. 158–161.
3. Tao W., Ming-Zhi W., Yu-Wei G., Xiao-Pu L., Yu-Cheng Z., Qin Z. Effects of Plastic Warm Deformation on Cementite Spheroidization of a Eutectoid Steel // J. Iron and Steel Research, International. 2012. V. 19. № 8. P. 60–66.
4. Karlsson B., Linden G. Plastic Deformation of Eutectoid Steel with Different Cementite Morphologies // Mater. Sci and Engineering. 1975. № 17. P. 153–164.
5. Toribio J. Relationship between microstructure and strength in eutectoid steels // Mater. Sci. Eng. A. 2004. V. 387–389. P. 227–230.
6. Toribio J. Identification of a new microstructural unit in cold drawn pearlitic steel: The pearlitic pseudocolony // Procedia Structural Integrity. 2020. V. 26. P. 360–367.
7. Ульянов А.И., Чулкина А.А. Магнитные свойства и коэрцитивная сила углеродистых сталей после пластической деформации и отжига // ФММ. 2009. Т. 107. С. 472–481.
8. Makar J.M., Tanner B.K. The effect of stresses approaching and exceeding the yield point on the magnetic properties of high strength pearlitic steels // NDT & E International. 1998. V. 31. № 2. P. 117–127.
9. Thompson S.M., Tanner B.K. The magnetic properties of specially prepared pearlitic steels of varying carbon content as a function of plastic deformation // J. Magn. and Magn. Mater. 1993. V. 132. P. 71–88.
10. Stashkov A.N., Kuleev V.G., Schapova E.A., Nichipuruk A.P. Studying Field Dependence of Reversible Magnetic Permeability in Plastically Deformed Low-Carbon Steels // Russian J. Nondestructive Testing. 2018. № 54. P. 855–861.
11. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. № 118. P. 102398.
12. Розенфельд Е.В., Ничипурук А.П. Модель Преайзаха для ферромагнетиков с кубической симметрией. I. Теория // ФММ. 1997. Т. 84. С. 29–46.
13. Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм, М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит.-ры. 1948. 816 с.
14. Ульянов А.И., Елсуков Е.П., Чулкина А.А. О роли цементита в формировании магнитных гистерезисных свойств пластически деформированных высокоуглеродистых сталей. I. Магнитные свойства и структурное состояние цементита // Дефектоскопия. 2006. № 7. С. 40–52.
15. Чулкина А.А., Ульянов А.И., Арсентьева Н.Б. О роли цементита в формировании магнитных гистерезисных свойств пластически деформированных высокоуглеродистых сталей. II. Магнитные свойства патентованной проволоки из стали 70 // Дефектоскопия. 2006. № 7. С. 53–64.